

A refração atmosférica e os seus problemas nas observações astronômicas⁺*

Guilherme de Almeida

Colégio Militar (atualmente professor aposentado)

Associação Portuguesa de Astrônomos Amadores (APAA)

Lisboa – Portugal

Resumo

Quando apontamos um telescópio na direção de um astro, estamos quase sempre apontando para uma direção mais acima, devido à refração da luz que atravessa a atmosfera da Terra. O fenômeno da refração atmosférica tem diversas implicações prejudiciais nas observações astronômicas, que serão objeto deste artigo.

Palavras-chave: *Altura de um astro. Zênite. Refração da luz. Índice de refração. Refração atmosférica. Refração diferencial. Atmosfera. Horizonte. Cor. Comprimento de onda. Visão astronômica. Achatamento aparente da imagem do Sol.*

Abstract

When we aim a telescope towards a celestial body, we are almost all times doing it on a direction slightly upwards of the true direction, because to the refraction of the light that crosses the Earth atmosphere. The atmospheric refraction has several detrimental implications to astronomical observations, that we will consider and explain along this article.

⁺ The atmospheric refraction and its effects in astronomical observations

^{*} *Recebido: outubro de 2013.
Aceito: fevereiro de 2014.*

Keywords: *Altitude of a celestial body. Zenith. Refraction of light. Refraction index. Atmospheric refraction. Differential refraction. Atmosphere. Horizon. Color. Wavelength. Astronomical seeing. Apparent flattening of the Sun image.*

I. Introdução

Quando apontamos um telescópio na direção de um astro, estamos quase sempre apontando para uma outra direção, mais acima, devido à refração da luz que nos chega do astro e tem necessariamente de atravessar a atmosfera da Terra antes de chegar à objetiva do telescópio, ou diretamente aos nossos olhos. Trata-se da refração atmosférica, que tem diversas implicações nas observações astronômicas, que trataremos neste artigo.

II. O problema da refração da luz na sua travessia da atmosfera terrestre

Quando a luz de um astro penetra na atmosfera terrestre, não o faz encontrando logo o ar como aquele que respiramos, mas sim um "ar" muito mais rarefeito. À medida que se encaminha para a superfície da Terra, essa luz vai encontrando ar cada vez mais denso e com índice de refração (n) gradualmente maior até que, junto ao solo, tal índice atinge o seu valor máximo. Como o desvio dos raios luminosos é tanto maior quanto mais elevado seja o índice de refração, e encontrando a luz índices de refração sucessivamente maiores, o trajeto dos raios luminosos será progressivamente mais desviado pela refração: será um trajeto curvo, como podemos ver na Fig. 1.

Nesta figura, z_a e z_v designam respectivamente a distância zenital aparente e verdadeira do astro observado; h_a e h_v designam as alturas aparente e verdadeira do mesmo astro. O raio luminoso entra na atmosfera em A (ponto meramente conceptual porque o limite superior da atmosfera é indefinido e difuso) e nesse início de trajeto através da atmosfera pouco se desvia (dado que a atmosfera é aí pouco densa), mas, à medida que se vai aproximando do solo, o desvio é progressivamente maior, resultando na linha curva marcada com traço mais espesso, com setas assinalado o sentido correspondente. As grandezas aparentes (z_a e h_a) correspondem ao que se observa e as grandezas verdadeiras (z_v e h_v) correspondem ao que se observaria se não houvesse atmosfera (nesse caso não existiria refração atmosférica). No caso de um astro no zênite, não se observa refração (desvio), pelo que, para

essa direção $z_a=z_v$ e $h_a=h_v$. A mesma figura permite ver que, exceto no caso do zênite, a altura aparente de um astro, num dado momento de observação, é superior à sua altura verdadeira; do mesmo modo, a distância zenital verdadeira é inferior à distância zenital aparente. É por isso que se diz que a refração atmosférica eleva a altura aparente dos astros, fazendo-os parecer mais elevados sobre o horizonte do que estariam se não houvesse atmosfera. A refração atmosférica (R) define-se como a diferença entre a altura aparente (h_a) e a altura verdadeira (h_v) de um astro num dado momento (veja a nota final 1):

$$R = h_a - h_v.$$

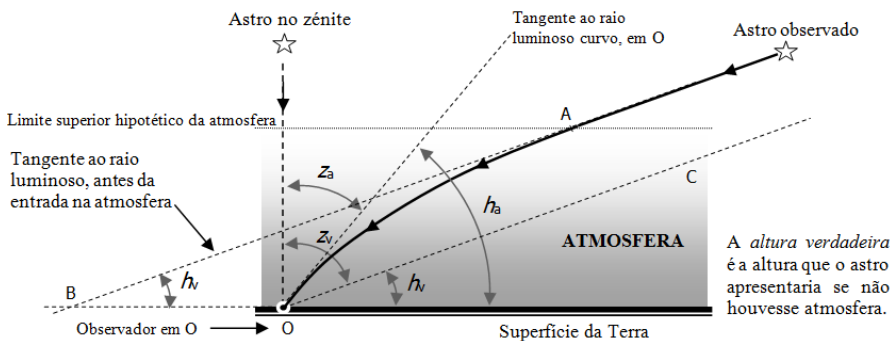


Fig. 1 – Representação esquemática do fenômeno da refração atmosférica. Para maior clareza, o encurvamento do raio luminoso foi muito exagerado e a distância do astro não foi representada à escala. A reta que passa em A e B é paralela à que passa em O e C. Refira-se que $h = 90^\circ - z$, como a figura evidencia. Figura de Guilherme de Almeida.

A Fig. 2 mostra que a refração atmosférica, sendo nula no zênite, cresce à medida que a altura dos astros diminui. E quando os astros se aproximam do horizonte, a refração cresce ainda mais depressa, como a tabela 1 também mostra.

Assim, a estrela Z é vista na direção Z', a estrela A é vista na direção A', B na direção B' e H na direção H'. Merece especial atenção o caso da estrela representada por H, vista no horizonte desimpedido, mas que na realidade, se não existisse atmosfera, estaria bastante abaixo do horizonte (cerca de $0,57^\circ = 34'$ abaixo do horizonte). E uma estrela que estivesse (sem refração) sobre o horizonte, seria vista, devido à refração a uma altura de $0,48^\circ = 28,8'$.

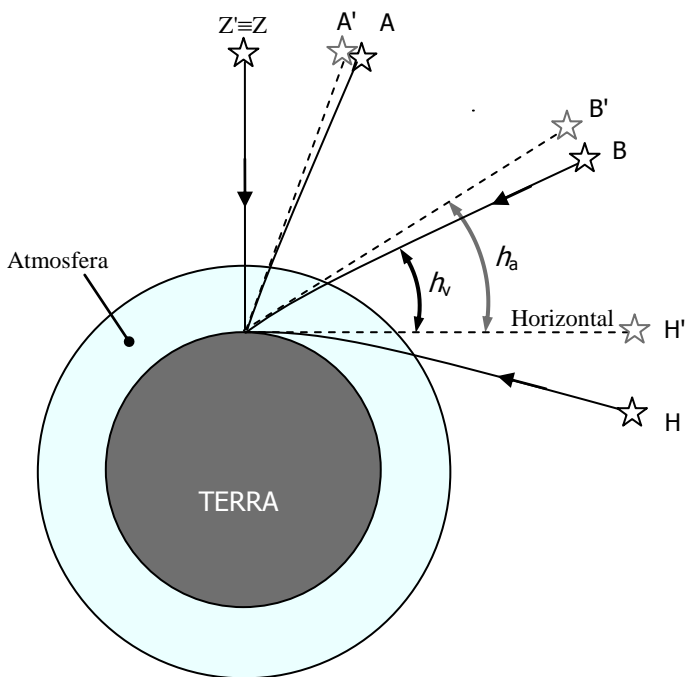


Fig. 2 – Exemplificação da refração atmosférica para estrelas a diversas alturas. Para maior clareza, o efeito da refração foi muito exagerado: se os encurvamentos dos raios luminosos fossem representados à escala, praticamente não se distinguiriam de segmentos retilíneos. Com a mesma intenção, a espessura da atmosfera foi também muito exagerada. Figura de Guilherme de Almeida.

Tabela 1 – Refração atmosférica para astros a diversas alturas.

[Valores para $\lambda=550$ nm, $p_0=1013$ hPa (101 325 Pa) e $t= 15$ °C (288,15 K)]

Altura aparente	Refração	Altura aparente	Refração	Altura aparente	Refração
90°	0,00'	40°	1,17'	2,5°	15,84'
80°	0,17'	30°	1,69'	2,0°	17,95'
70°	0,26'	20°	2,66'	1,5°	20,60'
60°	0,57'	15°	3,58'	1,0°	23,98'
50°	0,82'	10°	5,31'	0,5°	28,34'
45°	0,98'	5°	9,74'	0,0°	33,98'

III. A refração a várias cores

A situação que acabamos de considerar seria relativamente simples se a luz que recebemos dos astros fosse monocromática, mas sabemos que isso não é verdade. Na realidade, a refração atmosférica é diferente consoante à cor da luz (refração diferencial): é maior para a luz de menores comprimentos de onda (veja a nota final 2).

Já vimos que o *índice de refração* do ar (n_{ar}) cresce quando a altitude diminui. Acontece também que o índice de refração do ar varia com o comprimento de onda (cor) da luz: trata-se da *dispersão da luz*, produzida pela atmosfera. Assim (à pressão e temperatura normais, 101325 Pa e 273 K), ao nível do mar, o índice de refração do ar tem o valor $n=1,000\ 293$ para a luz de comprimento de onda $\lambda=550$ nm (amarelo-esverdeado). Para menores comprimentos de onda, esse índice é *maior*: por exemplo, 1,000296 para $\lambda=450$ nm (azul), 1,000298 para $\lambda=400$ nm (cor violeta). No domínio dos maiores comprimentos de onda o índice de refração do ar diminui: 1,000292 para 595 nm (laranja) e 1,000291 para 650 nm (vermelho); no domínio do infravermelho, n é ainda menor: por exemplo, $n=1,000289$ a 1000 nm). Portanto, simplificando, $n_{\text{azul}} > n_{\text{verde}} > n_{\text{amarelo}} > n_{\text{vermelho}}$ (veja-se que representamos o índice de refração do ar para cada cor inserindo junto da letra n o nome da cor da luz respectiva). Consequentemente, para o mesmo astro, num dado instante de observação, a sua altura aparente relativamente à luz de *menores* comprimentos de onda será *maior* do que para os maiores comprimentos de onda. Ou seja: $h_{\text{violeta}} > h_{\text{azul}} > h_{\text{verde}} > h_{\text{amarelo}} > h_{\text{vermelho}}$. A dispersão da luz é a causa destas diferenças de altura aparente segundo a cor.

A Fig. 3 mostra um feixe de raios luminosos policromáticos, vindos do astro observado até ao observador. Estando os astros muitíssimos afastados do observador terrestre, é aceitável admitir que os raios luminosos que nos chegam de cada ponto são paralelos entre si antes de entrarem na atmosfera (são mostradas apenas três cores, para maior simplicidade); na figura, as cores que formam um raio de luz branca foram representadas em raios separados antes da entrada na atmosfera da Terra (apenas por questões de clareza), mas são na realidade coincidentes. Desde o astro até ao ponto A, o trajeto é comum para todas as cores, sem diferenciação cromática. A partir daí, as diferentes cores sofrem refrações diferentes, produzindo-se percursos diferentes dos raios luminosos conforme a cor (*dispersão cromática*). Para maior clareza, a figura exagera o efeito, mas ele é facilmente observável, por exemplo, na observação telescópica de planetas, em que o bordo superior do limbo destes fica orlado de luz violeta e a parte de baixo fica orlada de luz vermelha, como podemos ver na Fig. 4. Nessa figura, a orientação da

imagem é direita. Num telescópio que inverte as imagens, o lado vermelho ficará voltado para o lado do zênite e o lado violeta ficará visível do lado de baixo. O efeito é tanto mais grave quanto menor for a altura do astro no momento da observação.

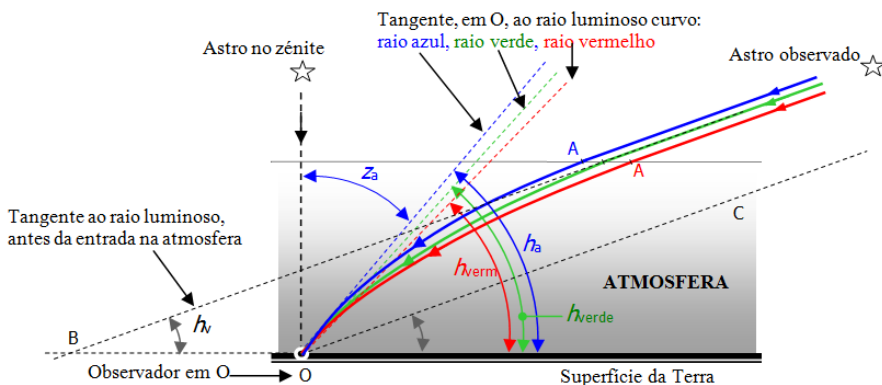


Fig. 3 – Representação simplificada do trajeto dos raios luminosos vindos de uma estrela a uma dada altura. Após a entrada na atmosfera, em A, a refração atmosférica é maior para a luz de menor comprimento de onda e mais suave para a luz de maior comprimento de onda. Embora a altura verdadeira seja a mesma, as alturas aparentes são diferentes para as diferentes cores. Para maior clareza, o efeito da refração foi muito exagerado, assim como a espessura da atmosfera. Figura de Guilherme de Almeida.

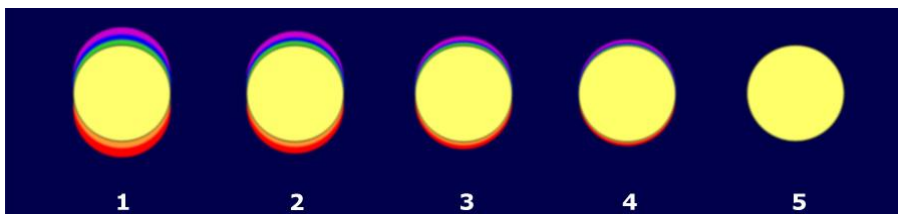


Fig. 4 – Simulação do aspecto de um planeta observado com elevada amplificação, em presença de dispersão significativa: 1 e 2- situações muito evidentes e exageradas; 3- dispersão mediana; 4- dispersão relativamente tênue; 5- aspecto que o planeta exibiria se não houvesse dispersão cromática. Nesta representação, o zênite está do lado de cima. Figura de Guilherme de Almeida.

A título de exemplo, convém referir que a separação entre os centros das imagens azul e vermelha, de acordo com a altura do astro, atinge respectivamente: 0,35" para $h = 60^\circ$; 0,60" para $h = 45^\circ$; 1,04" para $h = 30^\circ$; 2,24" para $h = 15^\circ$. Neste caso, a "altura do astro" (h) refere-se à cor da região central do espectro visível, na luz amarelo-esverdeada.

Pelas razões apontadas, é preferível observar os planetas quando estes apresentam alturas elevadas, $h > 50^\circ$ se possível, para minimizar estes problemas. No caso do Brasil, os planetas podem atingir alturas suficientemente grandes para permitir excelentes observações. Nos casos pouco favoráveis, o observador *crítico* verá imagens que se assemelham a situações intermédias entre os casos 3 e 4 da Fig. 4. Para minimizar o problema, procurando compensar esta dispersão, desenvolveram-se dispositivos baseados na inclinação de uma das lentes da ocular, ideia original do astrônomo George Airy (1801-1892), ou inserindo prismas ópticos rotativos junto à ocular (ideia inicialmente desenvolvida pelo óptico britânico Horace Dall - 1901-1986). Presentemente a empresa norte-americana *Adirondack* produz um corretor prismático denominado "*Planetary Atmospheric Dispersion Corrector*" (PADC), referido num artigo da revista *Sky & Telescope* de junho de 2005.

IV. As heterogeneidades do ar e o fator tempo: a turbulência e a dispersão cromática

A descrição da refração da luz no ar, tal como foi atrás indicada, aplicar-se-ia a uma atmosfera estacionária e sem grandes heterogeneidades na direção horizontal. Porém, o índice de refração do ar varia com a temperatura (diminui quando ela se eleva), com a pressão (aumenta quando ela sobe) e com a umidade atmosférica (diminui quando ela cresce). Assim sendo, e com massas de ar heterogêneas em movimento convectivo não laminar (turbulência atmosférica), a marcha dos raios luminosos através da atmosférica altera-se continuamente e de instante para instante: as imagens perdem nitidez, agitam-se e deformam-se, como todos os observadores celestes já verificaram. A frequência desta agitação pode assumir frequências desde poucos hertz até várias dezenas de hertz.

Para melhor compreendermos o significado e a importância da dispersão cromática produzida pela atmosfera, vamos comparar os seus efeitos com os da turbulência atmosférica. Poderão os efeitos prejudiciais da dispersão causar mais prejuízos à imagem do que a ação da turbulência? Faremos essa comparação (Fig. 5) tanto para noites de baixa turbulência (boa visão) como para noites de elevada turbulência (má visão). Podemos ver que, nas noites de má visão os efeitos da

dispersão se sobrepõem aos da turbulência caso a altura do astro seja inferior a cerca de 7° . Parece que o assunto nem precisa ser considerado. Mas se olharmos para o caso das noites de *boa visão*, podemos ver que a dispersão prejudica mais do que a turbulência e que tal situação só se inverte (dispersão menos prejudicial do que a turbulência) para astros a alturas superiores a cerca de 55° , o que já é preocupante.

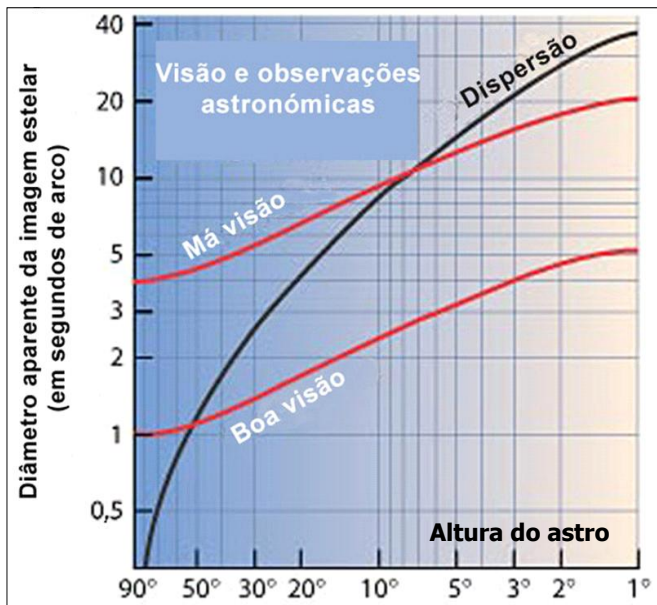


Fig. 5 – Efeitos da dispersão cromática da luz, comparados com os da turbulência (adaptado de um artigo de Alan R. MacRobert, sendo a ilustração original de Andrew T. Young).

V. A cintilação cromática

A turbulência, além de ser a causa da cintilação das estrelas, é independente para cada cor. A dispersão perturbada pela turbulência produz outro fenômeno curioso. A luz de cada cor segue um trajeto diferente através da atmosfera (Fig. 3). Assim, a cintilação para cada cor não está em fase com a cintilação nas outras cores, produzindo um efeito espetacular nas estrelas muito brilhantes. *Sírius* (α do Cão Maior), quando muito baixa no horizonte, em noites de *forte turbulência*, cintila de tal modo que quando se tem o máximo de brilho, por exemplo, no ver-

melho, as outras cores estão quase no mínimo e assim sucessivamente, verificando-se que a estrela, lampeja alternadamente em diferentes cores: é a *cintilação cromática*, perceptível a olho nu e também através de um telescópio.

VI. A refração atmosférica, o alongamento do dia e o achatamento aparente do Sol

Vimos que a refração atmosférica, nula no zênite, aumenta à medida que a altura de um astro diminui (tabela 1): vale menos de um' para a altura aparente 45° , atinge 5,3' quando $h_a = 10^\circ$, mas a partir daí cresce muito rapidamente à medida que nos aproximamos do horizonte, onde alcança 34', o que representa mais do que o diâmetro aparente médio do Sol (32'). Quando nos parece que o Sol toca o horizonte, na realidade, ele já se pôs (geometricamente).

Por pequenas alturas, uma pequena *variação* de altura determina uma diferença substancial na refração (fenômeno denominado *refração diferencial*), a tal ponto que o bordo inferior e o bordo superior do Sol serão afetados por refrações bastante diferentes. Por isso, quando o Sol está muito próximo do horizonte, quando o seu bordo inferior quase toca (aparentemente) o horizonte desimpedido, o seu bordo superior é mais elevado (pela refração) do que o seu bordo superior. É por isso que o Sol nos parece achatado quando nasce e quando se põe (Fig. 6). Tal fenômeno reduz-se gradualmente à medida que o Sol vai elevando sobre o horizonte. Isso também sucede com a Lua.

Por convenção, o nascer e o pôr do Sol referem-se aos instantes em que o bordo superior do limbo solar toca (aparentemente) o horizonte desimpedido. Nesse instante, a verdadeira altura do centro do disco solar é cerca de $-50'$, que se explicam do seguinte modo: $-34'$ para a refração e $-16'$ para o semidiâmetro aparente médio do Sol. Portanto, o Sol poente deixa de ser visto depois do que seria se não houvesse refração atmosférica. Como este mesmo fenômeno se repete ao nascer do Sol (que começa a ser visível também mais cedo do que se não houvesse refração), a duração da parte clara do dia é de alguns minutos mais longa do que seria se o nosso planeta não tivesse atmosfera.

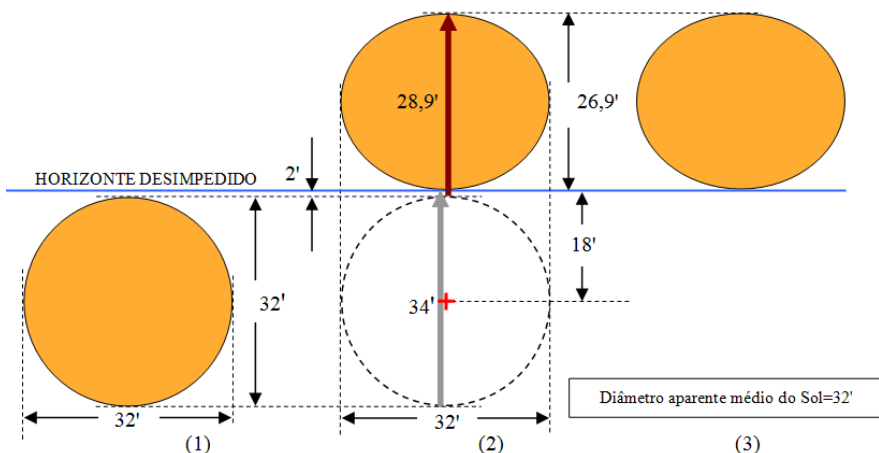


Fig. 6 – Simulação do aspecto do Sol poente (ou nascente), quando o seu bordo inferior parece tocar o horizonte. Se não houvesse atmosfera, o Sol estaria abaixo do horizonte, na posição (1), também representado a tracejado em (2). Devido à refração atmosférica, o bordo inferior do Sol é aparentemente elevado 34' e o bordo superior (naturalmente mais alto) é elevado apenas 28,9', resultando numa imagem achatada de, em média, 32' na horizontal e 26,9' na vertical. Em (3) mostra-se o aspecto do Sol nessa situação particular. Um fenômeno semelhante ocorre também com a Lua. Figura de Guilherme de Almeida.

Notas

(1) A refração atmosférica R também se define como $R = z_v - z_a$, onde z_v é a distância zenital verdadeira (a que se observaria se não houvesse refração atmosférica) e z_a é a distância zenital aparente (a que é observada). Esta definição é equivalente a $h_a - h_v$ (altura aparente menos altura verdadeira), expressão referida no artigo.

(2) A medida da refração atmosférica R , a 0 °C e 760 mmHg, para $\lambda = 550$ nm, é dada aproximadamente pela equação $R = 57,6 \tan z$, sendo esta fórmula válida para distâncias zenitais até 85°. Note-se que R varia pouco com a temperatura e a pressão do ar: uma diminuição de 3 °C aumenta R em 1%; um aumento de 900 Pa (6,75 mmHg) eleva R em 1%.

Referências

MACROBERT, A. M. Beating the Seeing. **Sky & Telescope**. Disponível em: <<http://www.skyandtelescope.com/howto/basics/3304176.html?showAll=y>>.

DOBBINS, T. AVA's Atmospheric Dispersion Corrector. **Sky & Telescope**, p. 88-91, jun. de 2005.

Outros links úteis:

<<http://www.jgiesen.de/refract/index.html>>.

<http://mintaka.sdsu.edu/GF/explain/atmos_refr/astr_refr.html>.

<<http://ganymede.nmsu.edu/holtz/a535/ay535notes/node3.html>>.

<<http://www.asterism.org/tutorials/tut28-1.htm>>.